Технические науки

УДК 533.9

ОЦЕНКА ДЖОУЛЕВЫХ ПОТЕРЬ И ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ФАКЕЛЬНОМ ПЛАЗМОТРОНЕ

В.А. Власов, И.А. Тихомиров, Ю.Ю. Луценко

Томский политехнический университет
E-mail: vlasov@tpu.ru

Получены выражения, описывающие величину волнового сопротивления и величину джоулевых потерь в конструктивных элементах высокочастотного факельного плазмотрона, имеющего металлическую разрядную камеру. Анализ проводился на основе модели плазмотрона в виде коаксиальной линии с учетом отражения электромагнитной волны в выходной части плазмотрона. Анализ выражения, полученного для волнового сопротивления плазмотрона, позволил выделить частотный диапазон, соответствующий оптимальному режиму работы плазмотрона.

Высокочастотный факельный разряд (ВЧФР), горящий в широком диапазоне давлений и газовых сред, находит практическое применение прежде всего в качестве источника потоков низкотемпературной плазмы. С этой целью были разработаны ВЧ факельные плазмотроны, обладающие достаточно высокими КПД и имеющие большой ресурс работы. В этих плазмотронах металлический трубчатый корпус обычно используется в качестве разрядной камеры [1?3] в которой установлен центральный электрод (рис. 1).

Проведем расчет джоулевых потерь и волнового сопротивления для ВЧ факельного плазмотрона. Оценка волнового сопротивления ВЧ факельного плазмотрона позволяет решить вопрос о согласовании плазмотрона с ВЧ-генератором, а также выявить режимы работы плазмотрона, при которых его электрический КПД максимален.

Расчет будем проводить с учетом наличия отраженной электромагнитной волны в канале ВЧФР. С целью упрощения анализа предположим, что длина токоведущей части разряда совпадает с длиной разрядной камеры плазмотрона. В этом случае мы можем считать, что отражение волны в конце плазмотрона носит синфазный характер.

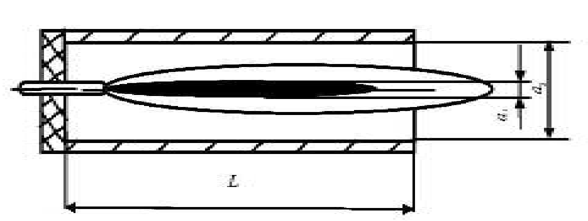


Рис. 1. Конструкция ВЧ факельного плазмотрона

Заметим, что цилиндрическая металлическая камера, расположенная соосно каналу горящего разряда представляет собой коаксиальную линию [2], где внутренним проводником служит канал разряда, а внешним проводником является разрядная камера плазмотрона.

Пространственное распределение полей для коаксиальной линии (рис. 1) с внутренним проводником радиуса a_1 и внешним цилиндром радиуса a_2 в соответствии с работой [4], а также с учетом отражения электромагнитной волны на конце линии, будет иметь вид:

$$E_{\rho_1} = \frac{m_1^{\eta}}{\kappa_1^2} H_{j1}; \qquad (1)$$

$$E_{\zeta_1} = \frac{m_1 l_1}{\kappa_1^2} \frac{\vartheta_0(l_1 \rho)}{\vartheta_1(l_1 \rho)} H_{j1}; \qquad (2)$$

$$H_{j1} = \frac{\kappa_1^2}{2p^{\alpha}{}_1 m_1 s_1} I \cdot \frac{\vartheta_1(l_1 \rho)}{\vartheta_1(l_1 \alpha_1)} \qquad (3)$$

$$E_{\rho_2} = \frac{m_2^{\eta}}{\kappa_2^2} H_{j2} \qquad (4)$$

$$E_{\zeta_2} = -\frac{m_2^{\eta}}{\varphi_2^2} \frac{A_0(l_2 \rho) + B_0(l_2 \rho)}{A_1(l_2 \rho) + B_1(l_2 \rho)} H_{j2} \qquad (5)$$

$$E_{\rho 3} = \frac{m_3^{\eta}}{\kappa_3^2} H_{j3} \cdot \frac{1}{\kappa_3^2} \cdot \frac{H_0^{(1)}(l_3 \rho)}{H_1^{(1)}(l_2 \rho)} \quad (6)$$

$$E_{\rho 3} = \frac{m_3^{\eta}}{\kappa_3^2} H_{j3} \cdot \frac{1}{\kappa_3^2} \cdot \frac{H_0^{(1)}(l_3 \rho)}{H_1^{(1)}(l_2 \rho)} \quad (7)$$

$$E_{\varsigma 3} = -\frac{m_3 l_3}{\kappa_3^2} H_{j3} \quad (8)$$

$$E_{\varsigma 3} = -\frac{m_3 l_3}{\kappa_3^2} H_{j3} \quad (9)$$

Здесь радиальные и осевые компоненты электрического и аксиальная компонента магнитного полей, соответственно (индексы

относятся соответственно, к областям

? угловая частота электромагнитного поля;

? проводимость в указанных областях;

? соответственно,

диэлектрическая и магнитная проницаемости

области;

? нулевые и первые функции

Бесселя, Неймана и функции Ханкеля первого рода;

? полный ток

разряда;

? длина плазмотрона

? волновое число

электромагнитной волны, распространяющейся в разряде;

? волновые числа

среды.

Заметим, что существенных отклонений от распределения компонент поля, описываемого выражениями (1?9) следует ожидать лишь на начальном и конечном

участках

плазмотрона, где для плазмоида разряда выполняется условие

т.е. условие сравнимости радиального и осевого градиентов комплексной диэлектрической проницаемости.

Величина волнового числа для случая экранированного факельного разряда определена авторами работы [2] и имеет следующий вид:

Здесь:

Уменьшение величины затухания электромагнитной волны в плазмотроне по сравнению с затуханием электромагнитной волны в свободно горящем ВЧФР связано с отражением поверхностной волны от стенок металлической разрядной камеры, что, в свою очередь, приводит к локализации электромагнитной энергии внутри камеры плазмотрона.

Определим джоулевы потери в стенках разрядной камеры плазмотрона и, соответственно, их вклад в суммарный энергетический баланс плазмотрона.

Из выражений (7) и (8) несложно видеть, что выполняется соотношение

В этом случае величина джоулевых потерь в стенках разрядной камеры плазмотрона

определится следующим образом:

где

? толщина стенки разрядной камеры.

Учтем, что в нашем случае

Интегрируя выражение (10) с использованием соответствующей аппроксимации функции Ханкеля, получим:

Здесь:

? модуль комплексного коэффициента из выражения

(9);

и

соответственно, действительная и мнимая части волнового числа

Используя соответствующие аппроксимации цилиндрических функций, а также уравнения сшивки тангенциальных компонент поля в точках скачкообразного изменения параметров среды, получим выражение для модуля коэффициента

которое имеет следующий вид:

При выводе формулы (13) нами предполагалось, что

Интегрируя выражение (11) по осевой координате и принимая во внимание формулу (12), для джоулевых потерь в стенках разрядной камеры плазмотрона получим следующее выражение:

Найдем отношение джоулевых потерь в стенках разрядной камеры плазмотрона к мощности электромагнитной энергии, выделяемой в канале разряда. Мощность джоулевых потерь в разряде с учетом выражений (1–3) определится следующим образом:

Учитывая выражения (13) и (14), определим отношение джоулевых потерь в стенках разрядной камеры к мощности, выделяемой в канале разряда:

Результаты численных расчетов величины

для случая лабораторного

высокочастотного факельного плазмотрона, имеющего мощность

приведены

в таблице. При этом:

Как видно из результатов расчетов, приведенных в таблице, потери в разрядной камере плазмотрона несущественны при определении суммарных энергетических потерь. Заметим

однако, что согласно выражению (15) величина

сильно возрастает при увеличении

проводимости канала разряда и частоты электромагнитного поля, т.к

Вследствие этого джоулевы потери в разрядной камере плазмотрона становятся сопоставимыми с мощностью разряда при температуре

и частоте электромагнитного поля в УВЧ или СВЧ диапазоне. В тоже время, условие ограничения величины групповой скорости электромагнитной волны в ВЧФР скоростью света, накладывает, в свою очередь, ограничение на проводимость канала разряда, которая

соответствует температурам, не превышающим

Вследствие этого джоулевы потери в разрядной камере мощного плазмотрона даже в УВЧ диапазоне не будут превышать нескольких процентов от мощности

разряда.

Определим величину волнового сопротивления высокочастотного факельного плазмотрона. Волновое сопротивление плазмотрона будет определяться [2] отношением напряжения между стенкой разрядной камеры и каналом разряда к полному току, протекающему в разряде:

Величина напряжения между стенкой разрядной камеры и каналом разряда определяется следующим выражением:

Преобразуем выражение (17) с учетом формулы (4) и малости величины

Получим:

Из условий сшивки тангенциальных компонент поля на границах разрыва среды определим величины

и

Получим:

Учитывая, что в нашем случае

проинтегрируем выражение (18). В результате получим следующее выражение для напряжения между каналом разряда и стенкой разрядной камеры плазмотрона:

Согласно выражению (16), волновое сопротивление плазмотрона определится из выражения (19) путем его деления на величину

Таким образом для величины волнового сопротивления высокочастотного факельного плазмотрона получим следующее выражение:

Мнимая часть выражения (20) дает нам величину реактивного сопротивления плазмотрона. В следствие этого из выражения (20) несложно получить формулы емкости

и индуктивности

плазмотрона, которые будут иметь следующий вид:

При этом

с учетом того, что электромагнитные колебания в

нашем случае описываются выражением вида